

# Anwenderorientierte Forschung mit hochkonzentrierter Solarstrahlung für industrielle Nutzungen

G. Dibowski  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Solarforschung  
Linder Höhe, 51147 Köln  
Email: gerd.dibowski@dlr.de

## Einführung

Das Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln, mit weiteren Forschungsstätten in Stuttgart, Jülich und Almería/Spain, arbeitet an der Entwicklung von konzentrierenden Solarsystemen zur Erzeugung von Strom, Wärme und Brennstoffen und damit an einer nachhaltigen Energieversorgung auf der Basis von Erneuerbaren Energien.

Die am Standort Köln eingesetzten Großanlagen, der Hochflusssdichte-Sonnenofen (Abb.1) und der Xenon-Hochleistungsstrahler, dienen der Erforschung und Erprobung neuer Technologien mit konzentriertem Sonnen- und Kunstlicht, wobei Bestrahlungsstärken von bis zu  $5 \text{ MW/m}^2$  und Temperaturen von bis zu  $2500^\circ\text{C}$  möglich sind. Seit der Inbetriebnahme des Hochflusssdichte-Sonnenofens im Jahre 1994 konnten bis heute rund 250 verschiedene Experimente durchgeführt werden. Sie reichen von der solaren Chemie und der Wasserstoff-erzeugung über Tests neuer Materialien bis hin zu Versuchen unter Vakuumbedingungen (Weltraumexperimente).



Abb.1 Gesamtansicht des Hochflusssdichte-Sonnenofens

Der besondere Wert dieser Anlagen mit Bezug auf Umwelt und Nachhaltigkeit besteht darin, dass neue technische Entwicklungen auf ihrer ersten Skalierungsstufe, also mit relativ überschaubarem Budget, für spätere, höher skalierte industrielle Anwendungen, detailliert simuliert werden können.

Im Sonnenofen wird das Sonnenlicht von einem ebenen Spiegel (Heliostat) auf einen Konzentrator reflektiert. Dieser bündelt die Strahlung so, dass der Fokus außerhalb der Achse des einfallenden Lichts in einem Laborgebäude liegt, wo die Experimente installiert werden. Durch eine Blende (Shutter) kann die einfallende konzentrierte Strahlung reguliert werden. Diese Anordnung wird als Off-Axis-Geometrie bezeichnet und bietet die Vorteile, dass der Fokus nicht mit dem Sonnenstand wandert und die Versuchsaufbauten die einfallende Strahlung nicht teilweise abschatten.

Die Möglichkeiten dieser über die Jahre sehr gut nachgefragten Testeinrichtungen sind derart vielfältig, dass nachfolgend einige signifikante Experimente beispielhaft beschrieben werden.

### **Beschleunigte Alterung**

Viele industriell hergestellte Kunststoffe sind während ihrer Lebensdauer äußeren Witterungseinflüssen, z.B. Sonnenstrahlung, Feuchte und Luftverunreinigungen ausgesetzt. Diese Einflüsse führen zu irreversiblen Vorgängen im Material, die in ihrer Gesamtheit als „Alterung“ bezeichnet werden.

Hauptauslöser für die Alterungsprozesse ist die auf das Material auftreffende UV-Strahlung, die wegen ihrer hohen Quantenenergie photochemische Prozesse in den Kohlenstoffverbindungen initiiert. Für die Hersteller von Kunststoffen, Farben und Lacken, für die Automobil- und Textilindustrie ist es von enormer Bedeutung, die Witterungsbeständigkeit ihrer Produkte im Vorhinein abschätzen zu können. Aus diesem Grund werden von den Herstellern während der Entwicklung neuer Produkte verschiedene Alterungstests durchgeführt. Diese Tests sollten hauptsächlich drei Anforderungen erfüllen: realitätsnahe Abbildung relevanter Alterungsprozesse, reproduzierbare Ergebnisse und kurze Testzeiten („beschleunigte Alterung“). Die Forderung nach kurzen Testzeiten folgt aus der Notwendigkeit, Fehler bei der Produktentwicklung schnell entdecken und Korrekturen umgehend testen zu können. Die üblicherweise eingesetzten Verfahren sind die Freibewitterung und die künstliche Bewitterung in speziellen Probenkammern mit Hilfe von Lampen-Filter-Kombinationen (i.d.R. Xe-Lampen). Im Fall von Autolacken liegen die Testzeiträume bei der Freibewitterung jedoch bei bis zu zwei Jahren und bei der künstlichen Bewitterung bei 6-9 Monaten. Deshalb besteht in o.a. Industriezweigen großes Interesse an "Schnelltests", die in deutlich kürzerer Zeit ähnlich zuverlässige Ergebnisse liefern sollen.

### **Schnelltests mit konzentriertem Sonnenlicht**

Die Beschleunigung der Alterungsprozesse wird dabei durch eine deutliche Erhöhung der Strahlungsdosis im UV (DLR-Jargon: „blauer Strahl“) mit Hilfe konzentrierter Solarstrahlung erreicht. Durch Teilung konzentrierter Sonnenstrahlung in einen kurzwelligen und einen langwelligen Teilstrahl kann eine wesentlich höhere Strahlendosis auf den Proben erzielt werden. Die hohe Belastung durch UV-Strahlung soll dabei eine Beschleunigung der UV-Alterung bewirken.

Abweichend von bereits bestehenden Verfahren wird dabei die Bestrahlung jedoch nicht mit dem kompletten Spektrum der Solarstrahlung erfolgen, sondern nur mit dem kurzwelligen, photochemisch relevanten Anteil. Die Teilung des Spektrums erfolgt durch einen selektiven Spiegel, der nur den UV-Anteil in eine Klimakammer leitet, in der die Lackprobe platziert ist. Der transmittierte Teil des Spektrums wird über eine Wärmesenke abgeführt. Auf diese Weise wird eine sehr viel höhere Intensität für die Alterung relevanten kurzwelligen Strahlungsspektrum erreicht, als in herkömmlichen Tests. Gleichzeitig wird dabei eine Überhitzung der Proben durch die Selektierung der Strahlung vermieden.

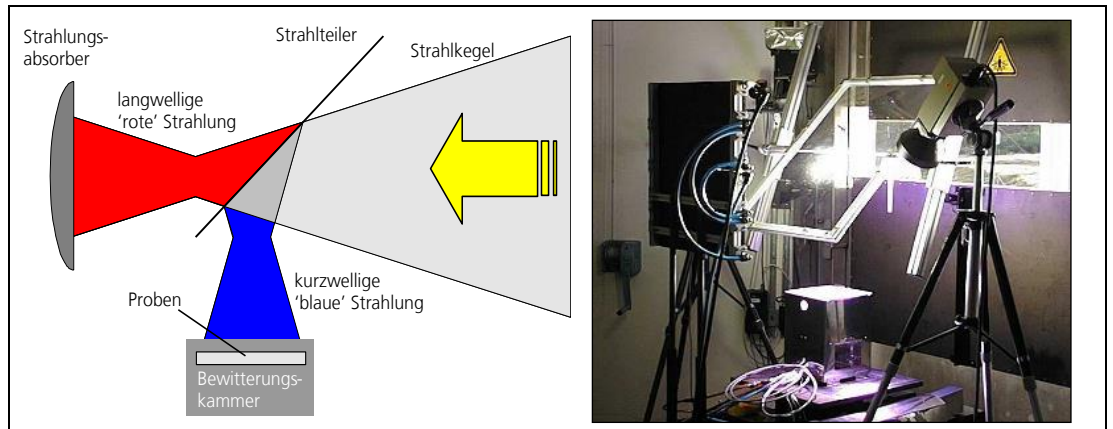


Abb. 2  
Beschleunigte Alterung mit konzentrierter Solarstrahlung. Durch Teilung des konzentrierten Strahls soll die Strahlendosis im photochemisch relevanten kurzwelligen Spektrum deutlich erhöht werden, ohne eine gleichzeitige Überhitzung der Proben zu bewirken. Die transmittierte langwellige Strahlung ( $> 450 \text{ nm}$ ) wird absorbiert.

Aufbau der Apparatur zur Erzeugung einer Bestrahlung mit konzentriertem Sonnenlicht von Standardlackproben der BASF Coatings AG. In der Mitte des Bildes sieht man den Strahlteilerspiegel, links davon steht der Absorber für den langwelligen Strahlungsanteil und unter dem Spiegel ist die Bewitterungskammer befestigt. In der rechten Bildhälfte ist der teilweise geöffnete Shutter des Sonnenofens zu sehen, durch den die konzentrierte Solarstrahlung eintritt. (Foto: DLR)

Das gemessene UV-Spektrum auf die Probe ist in Abb. 3 dargestellt:

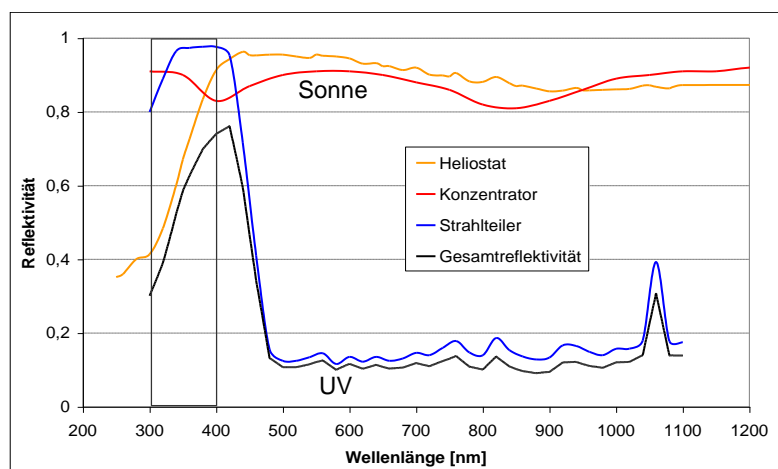


Abb. 3

Vergleich von Sonnenspektrum und eingestelltem UV-Spektrum auf die Probe

Bei vielen Alterungstests, vor allem im Bereich der Autoindustrie, wird als Maß für die Strahlungsbelastung die Strahlendosis im Spektralbereich zwischen 300 und 400 nm angegeben. Durch Integration der Bestrahlungsstärke über den Tag erhält die Dosis im Zentrum der Probenebene mit der herkömmliche Verfahren verglichen werden können. So kann eine Freibewitterung (Miami) von einem Jahr Dauer auf 10 Stunden verkürzt werden. Bei einer Alterung unter Kunstlicht (Ci5000 Weather-Ometer) auf 140 Stunden [1].

Der Einsatz des Sonnenofens zur Konzentration des UV-Anteils im Sonnenlicht ermöglicht somit eine deutliche Steigerung der Strahlendosis im relevanten Spektralbereich in deutlich kürzerer Zeit, ohne dass die Proben durch zu hohe Temperaturen geschädigt werden [2].

Ein aktueller Auftrag aus der Baustoffindustrie zu diesem Thema ist mit der Nachweispflicht der Europäischen Union begründet, dass Dichtungs-Fugenmassen im Straßenbau vor ihrer Zulassung ihre UV-Beständigkeit über einen Zeitraum von 25 Jahren nachweisen müssen. Mit spezieller UV-Lampentechnik, die die Wirkung der Sonne angemessen simuliert, ist das DLR in der Lage, die UV-Belastung eines Jahres innerhalb von 150 Bestrahlungsstunden verkürzt darzustellen.

### **Solare CO<sub>2</sub>-freie Wasserstofferzeugung**

Im Rahmen des Projekts HYDROSOL [3] konnte im Sonnenofen erstmalig gezeigt werden, wie Wasser in einem geschlossenen thermochemischen Kreisprozess mittels Solarenergie in Wasserstoff und Sauerstoff - und ohne Kohlendioxid-Emissionen - gespalten werden kann. Das Verfahren nutzt im Gegensatz zur direkten thermischen Wasserspaltung, die erst bei einigen Tausend Grad Celsius erfolgt, die Kombinationen verschiedener chemischer Reaktionen. Diese laufen bei Temperaturen von unter 1200 Grad Celsius ab und sind daher materialtechnisch beherrschbar.

Den Wissenschaftlern gelingt es bei diesen Reaktionen alle verwendeten Chemikalien -bis auf das eingesetzte Wasser und den produzierten Gasen Sauerstoff und Wasserstoff- zurück zu gewinnen und erneut einzusetzen.



Abb.4

Links: Hydrosol-Reaktor im DLR-Sonnenofen, Rechts: Eintritt der Solarstrahlung; Eindüsen von Wasserdampf und Reaktion im keramischen Parallelkanalmonolithen

Hierbei werden mit Metalloxiden beaufschlagte SiSiC-Keramik-Gitter auf etwa 800°C aufgeheizt, wobei Wasserdampf in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird. Nach der Sättigung des Keramik-Gitters wird das Metalloxid durch Erhitzen über 1000°C regeneriert und der Prozess kann erneut gestartet werden.

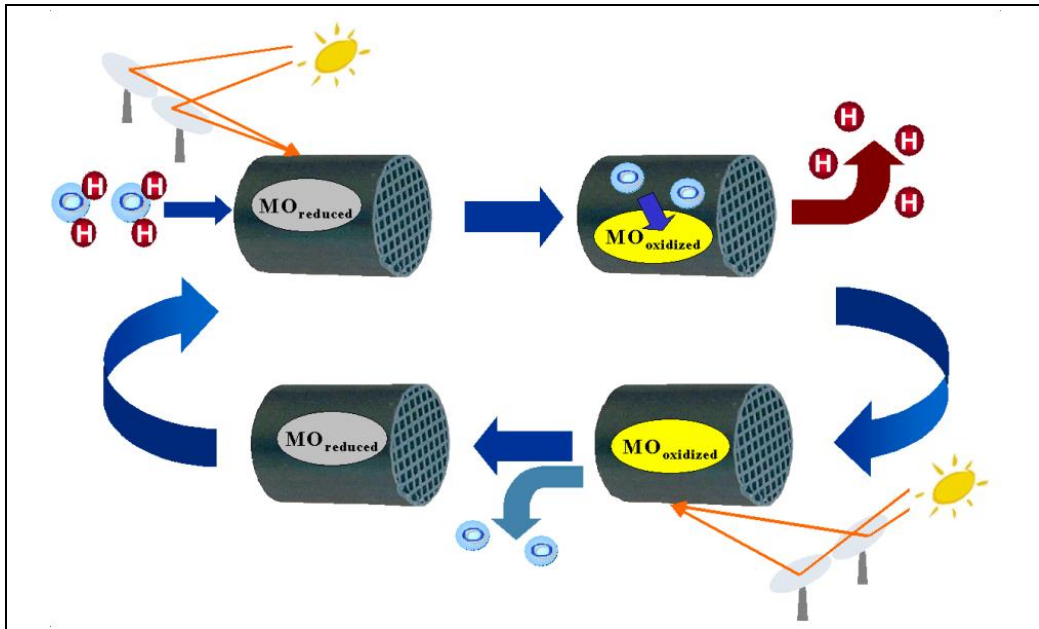
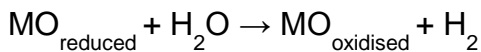
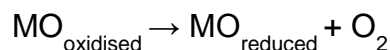


Abb. 5

Erster Schritt: spalten von Wasserdampf durch ein reduziertes Eisenmischoxid im Keramikgitter, das den Sauerstoff aus dem Wasserdampf bindet gemäß:



Im nächsten Schritt (der Regeneration) wird das Material wieder reduziert, indem am Gitter gebundener Sauerstoff freigesetzt wird:



Thermochemische Kreisprozesse laufen mit einem Wirkungsgrad von bis zu 50 Prozent besonders effizient ab. Somit können die Forschungsarbeiten aus dem Projekt HYDROSOL die Grundlage für eine zukünftige, erneuerbare Wasserstoffwirtschaft darstellen. Es scheint nun möglich, dass Wasserstoff als ein Energieträger der Zukunft ohne klimaschädliche Emissionen von Kohlendioxid im großtechnischen Maßstab erzeugt werden kann.

Für diese wegweisenden Arbeiten wurde das Projektteam im Jahre 2007 in Brüssel mit dem angesehenen Descartes-Preis für Forschung der Europäischen Kommission ausgezeichnet.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden die Versuche an einer 20 mal größeren (höher skalierten) Pilotanlage mit einer Leistung von zweimal 100 kW<sub>th</sub> auf der Plataforma Solar de Almería fortgeführt.



### CO<sub>2</sub>-Einsparung durch Solarthermische Kraftwerke

Solarthermische Kraftwerke (Parabolrinnen- oder Turmkraftwerke) gehören im Pool der Erneuerbaren Energietechniken zu den Hoffnungsträgern zur Bereitstellung von CO<sub>2</sub>-freiem stabilem Grundlaststrom. Die Speicherung von Wärme in Flüssigsalzspeichern zur Versorgung der Turbine nach Sonnenuntergang auf Nennlast -über mehrere Stunden- gilt als technisch gut beherrschbar und effizient. Zur Verbesserung des Anlagen-Gesamtwirkungsgrades betreibt das DLR in Jülich das Test-Turmkraftwerk STJ (Abb. 6). Der Receiver ist hierbei das Schlüsselement, um aus konzentrierter Solarstrahlung Wärme für den Strom erzeugenden Kreisprozess bereitzustellen. Unter anderem sind weitere Forschungsarbeiten an dieser Receivertechnik notwendig.



Abb. 6 Testanlage Solarturm Jülich STJ

Abb. 7 zeigt den Luftreceiver des Solarturms Jülich, der aus 1080 einzelnen SiSiC-Parallelkanal-Monolith-Absorbern besteht. Durch die Kanäle der Absorber wird Umgebungsluft angesaugt, auf ca. 800°C erhitzt und danach direkt der Stromproduktion zugeführt.

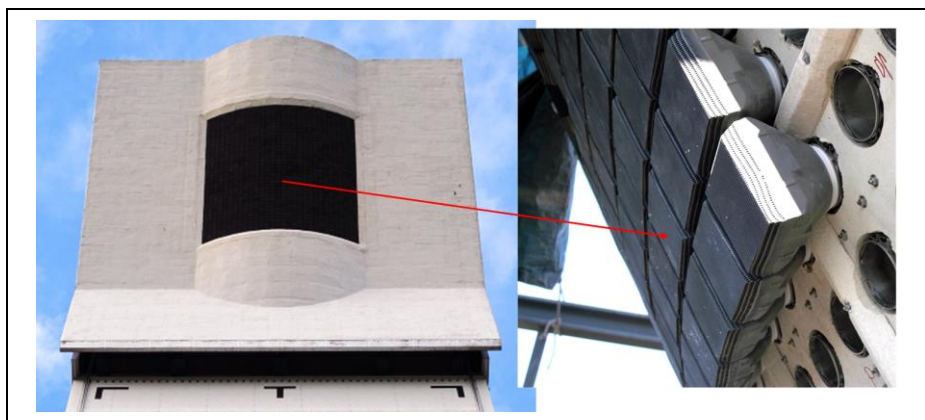


Bild 7 Receiver des Solarturms Jülich bestehend aus 1080 SiSiC-Parallelkanal-Monolithen

Die einzelnen Absorber wurden am Xenon-Hochleistungsstrahler (Sonnen-simulator), in direkter Nachbarschaft zum Sonnenofen, auf Effizienz und Betriebsverhalten getestet. Der Teststand ermöglicht den Betrieb eines Standard-Absorbermoduls (140x140mm) unter denselben Bedingungen wie im großtechnischen Receiver wie z.B. die Untersuchung der thermischen Zyklenbelastung mit konzentrierter Strahlung [Abb. 8].

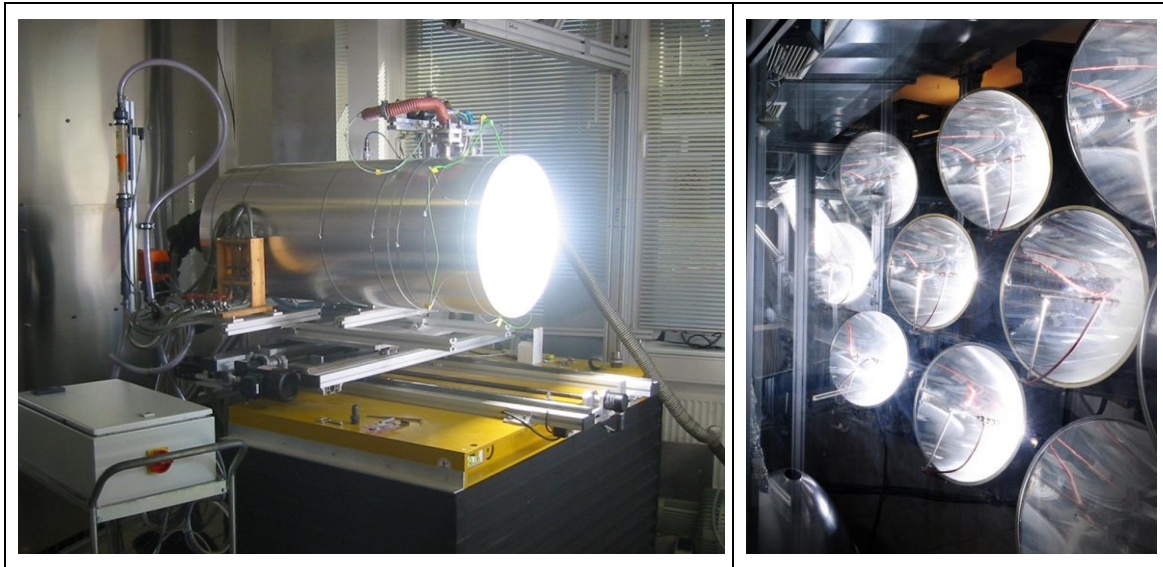


Abb. 8 Links: Testbett unter Bestrahlung; rechts Ausschnitt des Xenon-Hochleistungsstrahlers

Abb. 9 zeigt den bestrahlten Testabsorber und die dazugehörige Temperaturmessung bei 1000°C zur Wirkungsgrad- und Festigkeitsbestimmung. Simuliert wurde dabei auch ein flaches Einstrahlungsprofil der Solarstrahlung, wie es sich später auch unter endgültigen Bedingungen im Verbund mit tausenden von einzelnen Absorbern einstellt.

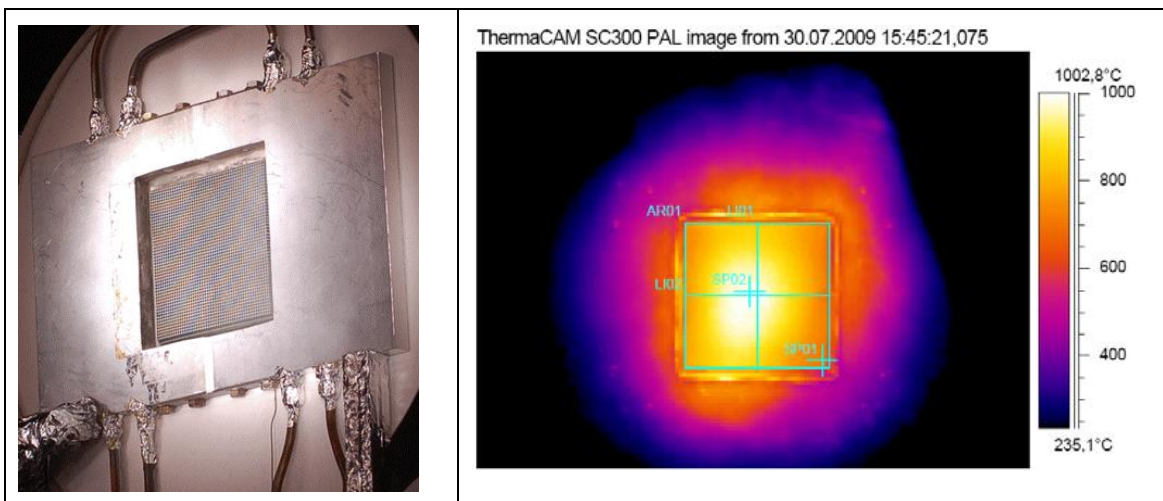


Abb. 9 Links: Testabsorber unter Bestrahlung;  
Rechts: Darstellung der Temperaturgradienten mittels Wärmebildkamera



## Weltraumkomponenten-Simulation

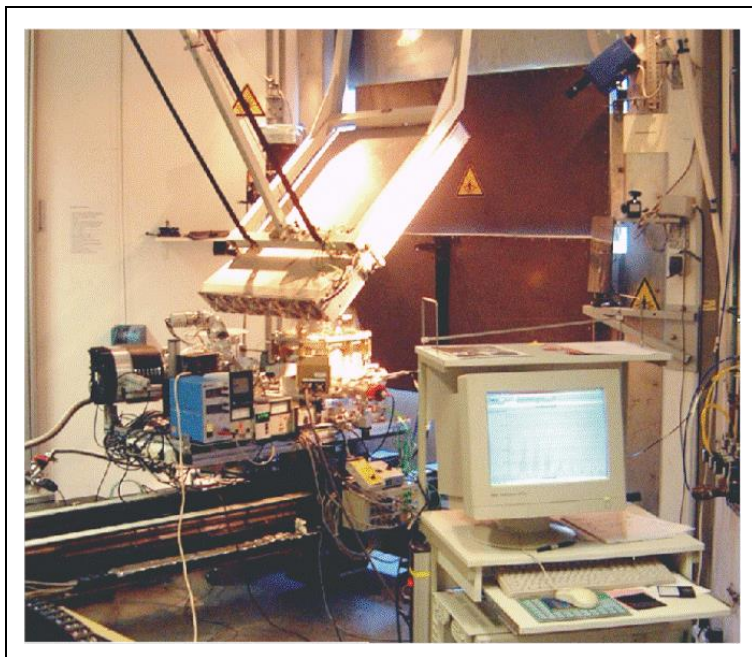
Seit über zehn Jahren werden am Sonnenofen wie auch am Hochleistungsstrahler Komponenten für die Raumfahrtindustrie getestet. Wenn Bauteile auf ihr Verhalten unter kosmischen Bedingungen hin untersucht (simuliert) werden sollen, dann bietet es sich an, die Sonne als Energiequelle zu nutzen, anstatt fossile Quellen oder Lampen-Arrays zu bemühen. Bei Tests solcher Einzelteile wie Fotozellen, Isolierschichten oder Schutzplatten geht es meistens um die Widerstandsfähigkeit gegenüber harten und lang anhaltenden thermischen sowie ultravioletten Belastungen, wie sie im Weltraum auftreten. Die Kunden der DLR-Wissenschaftler sind europaweit agierende Hersteller von Satelliten, wie EADS Astrium in Toulouse, Alenia Thales Space oder auch die Europäische Weltraumorganisation ESA [4].

Die Bandbreite der Experimentinhalte ist hierbei sehr groß. Gemeinsam haben allerdings alle Experimente, dass die Weltraumindustrie einen sehr hohen Anspruch an die Qualität der DLR-Messtechnik hat. Dass dies so ist wird indirekt durch die ständige Beauftragung von neuen Tests bestätigt.

Ein besonderes Beispiel stellt hierbei das durch thermische Spaltung beziehungsweise Pyrolyse von Mondgestein untersuchte Potenzial zur Sauerstoffgewinnung, Abb. 10, dar.

Abb. 10

Untersuchung zur  
Sauerstoffgewinnung  
aus Mondgestein  
mittels Pyrolyse  
mit Hilfe konzentrierter  
Solarstrahlung



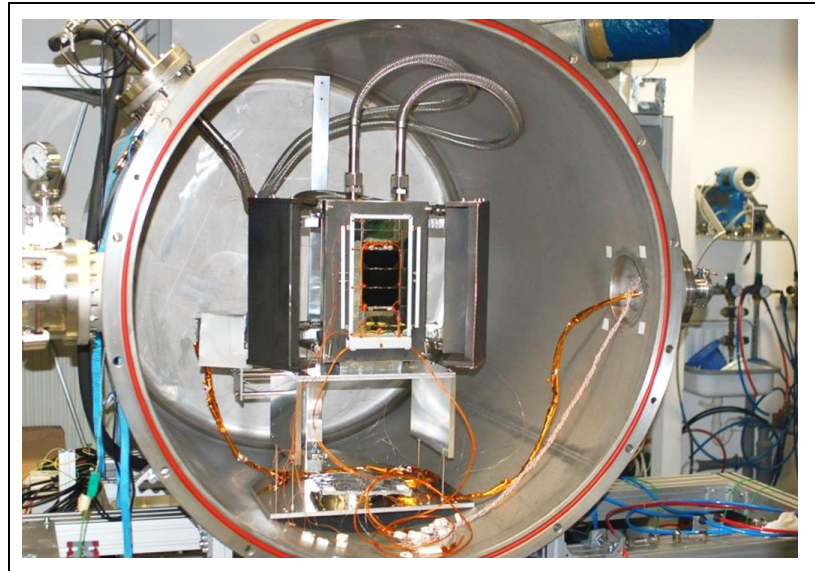
Komponenten der Merkur-Raumsonde *Bepi Colombo* werden seit Jahren im Sonnenofen getestet. *Bepi Colombo* ist die erste ESA-Mission, die einen Satelliten in heiße Regionen bringt. Ist der Planet Merkur erreicht, wird die der Sonne zugewandte Seite des Satelliten extrem heiß und die Rückseite gleichzeitig extrem kalt. Diese hohen thermischen Belastungen lassen sich mit einem Sonnenofen hervorragend simulieren.



Um die thermische Langzeitbelastbarkeit von Fotozellen für Satelliten zu testen, werden Versuchsbedingungen eingestellt, die eher etwas härter sind, als sie für die spätere Mission erwartet werden. Damit will man sichergehen, dass diese enorm wichtige Baugruppe genug „Stabilitätsreserve“ hat. Dazu wird die Zelle unter Vakuumbedingungen entsprechend lange bestrahlt (Abb. 11).

Abb. 11

Positionierte Fotozelle  
des Satelliten  
*Bepi Colombo*  
in der offenen  
Vakuumkammer



Die von den DLR-Ingenieuren für alle Experimente entwickelte notwendige Flusssichte-Messtechnik (Bestimmung der 2-dimensionalen Leistungsverteilung auf der Aperturfläche) gilt weltweit als führend. Die besonders hohen Anforderungen der Kunden aus der Weltraumindustrie an die Präzision der Messungen führte auch über die Jahre zu einer Gesamtverbesserung des Systems Sonnenofen. Davon wiederum profitieren nun auch die Experimentatoren aus dem ursprünglichen Kerngebiet der Erneuerbaren Energien.

### Ausblick

Die aufgeführten Beispiele stehen repräsentativ für bisher über 250 durchgeführte Experimente für Forschung und Industrie mit konzentriertem Sonnen- und Kunstlicht. Hierbei stehen immer die Fragen nach Ressourcenschonung, Reduzierung negativer Umwelteinflüsse, Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen oder die Entwicklung umweltfreundlicher Techniken im Vordergrund.

Ein besonderes, das aktuelle Projekt „RegoLight“ [5], befasst sich mit der Frage, ob es möglich ist, einen Sonnenofen als 3D-Drucker auf dem Mond zu betreiben. Es soll versucht werden aus Mondstaub (Regolith) Schutzkuppeln für die geplanten wissenschaftlichen Laboratorien herzustellen, um zu vermeiden, dass umfangreiches vorgefertigtes und schweres Baumaterial von der Erde aus ‚hochgebracht‘ werden muss (Abb.12).



Abb. 12 Artist-View einer Laboreinheit auf dem Mond mit benötigter Schutzkuppel zur Abwehr von Meteoriten und UV-Strahlung

Dafür soll Regolith knapp unter seinen Schmelzpunkt auf etwa 1100 Grad Celsius erhitzt werden. Dabei verklebt (versintert) er zu einem festen Körper. Die konzentrierte Sonnenenergie wird auf eine Platte projiziert auf der der aufgebraute Mondstaub Schicht für Schicht in die gewünschte Struktur gesintert wird. Im Kölner Sonnenofen wird die 3D-Sinterfähigkeit 2016 ausführlich untersucht werden.

### Neue Testeinrichtung SynLight

Das DLR baut derzeit den weltgrößten Sonnensimulator (in der Nähe des Solar-turms Jülich). Diese neue Testeinrichtung, genannt SynLight [6], soll eine Lücke zwischen dem heutigen Labormaßstab und der typischen Größe von industriellen Nutzungen schließen. *SynLight* besteht aus 149 7 kW Xenon-Kurzbogenlampen mit einem Sonnen-nahen Lichtspektrum. Die Gesamt-Strahlungsleistung wird bei etwa 280 kW liegen, die erreichbare Temperatur bei etwa 3500°C. Ab Anfang 2017 wird *SynLight* für interessierte Experimentatoren aus Wissenschaft und Industrie zur Verfügung stehen (Abb. 13).

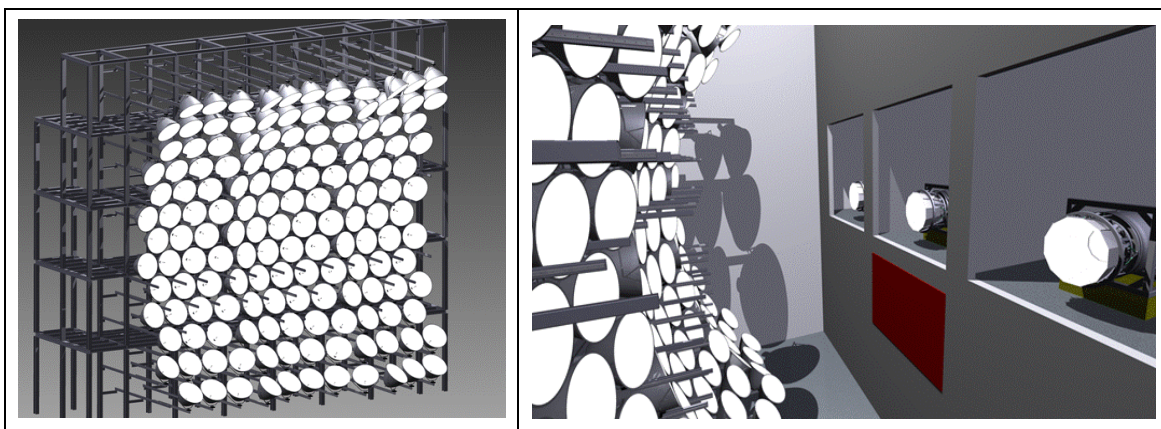


Abb. 13 Artist-View des weltgrößten Sonnensimulators *SynLight* am DLR-Standort Jülich

## Literatur

[1] J. Kaluza, A. Witzke, A. Neumann; „Alterungsexperimente mit konzentrierter Solarstrahlung: Das Projekt Blauer Strahl“; 4. Kölner Sonnenkolloquium, Köln, 21.06.2000

[2] A. Witzke, A. Neumann, J. Kaluza, M. Demuth, P. Ritterskamp: „Test of a Device for Accelerated Ageing of Polymeric Material in High Concentrated Sunlight at the DLR Solar Furnace“; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (German Aerospace Center), Forschungsbericht 2001-10; pp. 152 - 158; ISSN 1434-8454; Köln 2001

[3] C. Agrafiotis, L. Nalbandian, V.T. Zaspalis, M. Roeb, C. Sattler, A. Steele, P. Stobbe, A. Konstandopoulos; “HYDROSOL - Advanced Monolithic Reactor for Hydrogen Generation from Solar Water Splitting”; in: 8th Cologne Solar Symposium DLR. 14.06.2005, Köln

[4] G. Dibowski; „Ein Stück Kosmos vor der Haustür, Weltraumexperimente am DLR-Sonnenofen“; DLR-Magazin136; <http://www.dlr.de/>; Köln 2012

[5] “RegoLight Kick-Off- Symposium” DLR Köln, 19./20. November 2015

[6] K. Wieghardt, K.-H. Funken, G. Dibowski, B. Hoffschmidt, D. Laaber, P. Hilger, K. Eßer; “Synlight - The World's Largest Artificial Sun“ in: Tagungsband Solar Paces 13.-16. Oktober 2015, Kapstadt, Südafrika